

doi: 10.3788/gzxb20164504.0406001

# 空间激光通信移动平台的自抗扰视轴稳定控制

曹阳<sup>1,2</sup>, 刘世涛<sup>1</sup>

(1 重庆理工大学 电子信息与自动化学院, 重庆 400054)

(2 电子科技大学 物理电子学院, 成都 610054)

**摘 要:**分析空间激光通信移动平台角运动和框架偏转之间的速度耦合关系, 给出克服移动平台角运动的视轴稳定方法, 针对视轴稳定系统中存在的非线性、多干扰问题, 应用自抗扰控制法对三轴视轴稳定系统进行分散独立控制, 采用模糊理论对自抗扰控制器的相关参量进行自整定. 仿真和模拟实验表明: 在 1 Hz 条件下, 相对于参量辨识控制法, 模糊自抗扰控制法的抗扰动隔离度提高了 7.4 dB; 在模拟扫频实验条件下, 将 1~2 Hz 与 2~4 Hz 的扰动实验区间进行比较, 模糊自抗扰控制法的抗扰动隔离度下降仅 2.2 dB. 模糊自抗扰控制具有较好的快速响应性、较小的超调和频率适应性, 能够满足系统稳态准确度的要求, 并能克服平台角运动耦合、不确定性扰动问题.

**关键词:**空间移动平台; 空间激光通信; 视轴稳定; 自抗扰控制; 模糊理论

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)04-0406001-6

## Optical Axis ADRC Stabilization of Free Space Optical Communication Based on Space Mobile Platform

CAO Yang<sup>1,2</sup>, LIU Shi-tao<sup>1</sup>

(1 School of Electronic Information & Automation, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

(2 School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** The velocity coupling relationship between the moving platform and the frame deflection was analyzed, optical axis stabilization method was deduced, and aiming at the non-linearity, multi-interference in optical axis stabilization, active disturbance rejection controller based on fuzzy reasoning was proposed to control three axis stabilization systems. Through software simulation and experiment: under 1 Hz disturbance, with respect to parameter identification method, anti-disturbance isolation degree based on active disturbance rejection controller is increased by 7.4 dB, in the experimental condition of the sweep frequency from 1~2 Hz to 2~4 Hz, the anti-disturbance isolation degree of the fuzzy auto disturbance rejection control method decrease only 2.2 dB. Fuzzy auto disturbance rejection controller has better fast response, smaller super adjustment and frequency adaptability, also can overcome the platform angular motion and uncertainty disturbance.

**Key words:** Space mobile platform; Free space optical communication; Optical axis stabilization; Active disturbance rejection controller; Fuzzy method

**OCIS Codes:** 060.2605; 060.4510; 120.1880

## 0 引言

随着卫星激光通信关键技术的突破和激光所具有

优势的逐步体现<sup>[1-3]</sup>, 以空间移动平台为节点的激光通信链路的重要性日渐突出并逐渐成为研究热点. 空间移动平台是指各种近地飞行器, 如飞机、飞艇、浮空气

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61205106), 中国博士后科学基金(No. 2014M552329), 重庆教委科学技术研究项目(Nos. KJ120827, KJ1500934) 资助

第一作者: 曹阳(1977-), 男, 副教授, 博士后, 主要研究方向为自由空间激光通信技术. Email: caoyjz@cqu.edu.cn

收稿日期: 2015-09-25; 录用日期: 2015-12-16

<http://www.photon.ac.cn>

球等<sup>[4-5]</sup>,在军事和科研上有广阔的应用前景.目前,欧洲和美国在此领域研究处于领先水平,其中代表性项目有欧洲开展的CAPANINA项目<sup>[5]</sup>,美国国防高级研究计划局开展的战地光微波混合链路计划<sup>[6]</sup>.但由于通信激光光束窄、发散角小,同时空间移动平台的自身角运动、外界扰动(如风、气流)以多种方式耦合到激光通信终端,严重影响激光通信终端的视轴稳定<sup>[7-10]</sup>,因此空间激光通信移动平台的视轴稳定是建立激光通信链路的重要保障.

相对于陆基空间激光通信系统,基于空间移动平台的激光通信的视轴稳定需要解决以下难题:1)如何隔离空间移动及其伺服系统的运动耦合扰动;2)空间激光通信平台的视轴稳定是一个多约束、多变量耦合问题,被控对象的参量如转动惯量、摩擦力矩等并不是保持不变的,典型视轴稳定控制有滑模变结构控制、现代控制理论等,滑模变结构控制调和了系统动态响应速度和静态稳定性之间的矛盾,但由于扰动的存在影响了控制系统的稳态准确度<sup>[11]</sup>,现代控制理论可以提升视轴稳定系统的性能,但是设计难度大,计算复杂,运算量往往较大<sup>[12]</sup>.针对以上问题,本文分析移动平台与框架间的运动耦合对视轴稳定的影响,以此为基础,将自抗扰控制(Active Disturbance Rejection Controller, ADRC)应用于视轴稳定解耦控制中,抑制空间环境引起的非线性不确定扰动,为解决自抗扰控制中需整定的参量过多问题,将模糊理论和自抗扰控制相结合.仿真和实验结果表明,自抗扰控制器具有较好的频率自适应性和抗外部扰动能力,具备较好的工程应用价值.

## 1 视轴稳定伺服系统的运动解耦

视轴稳定伺服系统的光轴角速率是由三轴框架角偏转和载体自身角速率耦合而成,为了消除载体角运动对激光通信视轴的影响,采用捷联稳定方式实现视轴稳定<sup>[13]</sup>,如图1所示,直接测量载体运动,得到载体角速度信息,送入数字信号处理器,并进行相应的控制.

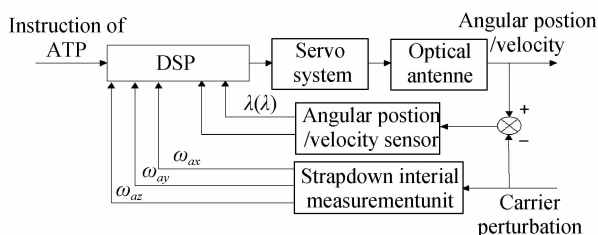


图1 视轴稳定原理框图

Fig. 1 Stabilization diagram

设载体的横滚、俯仰和方位角速率分别为 $\omega_x = (\omega_{ax}, \omega_{ay}, \omega_{az})$ ,视轴稳定伺服平台的外框、中框和内框角度偏转 $\lambda = (\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z)$ ,那么载体到外框、外框到中

框、中框到内框之间的坐标系变换分别为<sup>[14]</sup>

$$\begin{cases} T_{ax} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \lambda_x & \sin \lambda_x \\ 0 & -\sin \lambda_x & \cos \lambda_x \end{bmatrix} \\ T_{yx} = \begin{bmatrix} \cos \lambda_y & \sin \lambda_y & 0 \\ -\sin \lambda_y & \cos \lambda_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ T_{zx} = \begin{bmatrix} \cos \lambda_z & 0 & -\sin \lambda_z \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \lambda_z & 0 & \cos \lambda_z \end{bmatrix} \end{cases} \quad (1)$$

载体角速率 $\omega_a$ 对光学天线的视轴形成最终的扰动 $\omega_{\alpha}$ 为

$$\omega_{\alpha} = T_{zy} T_{yx} T_{xm} \omega_a \quad (2)$$

内框架与光学天线同轴,因而内框架的俯仰角速率与光学天线视轴角速度相一致,内框架的俯仰角速率可表示为

$$\dot{\lambda}_{fz} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \dot{\lambda}_z \quad (3)$$

三框架中的外框架、中框架对内框架的速度耦合分别表示为

$$\begin{cases} \dot{\lambda}_{\alpha x} = T_{zy} T_{yx} \dot{\lambda}_x = \begin{bmatrix} \cos \lambda_z \cos \lambda_y \\ -\cos \lambda_y \cos \lambda_z \\ \sin \lambda_z \end{bmatrix} \dot{\lambda}_x \\ \dot{\lambda}_{\alpha y} = T_{zy} \dot{\lambda}_y = \begin{bmatrix} \sin \lambda_z \\ \cos \lambda_z \\ 0 \end{bmatrix} \dot{\lambda}_y \end{cases} \quad (4)$$

那么三框架偏转最终形成的视轴角速度耦合为

$$\dot{\lambda}_{\alpha f} = T_{\alpha} \omega_m + \dot{\lambda}_{\alpha x} + \dot{\lambda}_{\alpha y} = \begin{bmatrix} \cos \lambda_z \cos \lambda_y & \sin \lambda_z & 0 \\ -\cos \lambda_y \cos \lambda_z & \cos \lambda_z & 0 \\ \sin \lambda_z & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\lambda}_x \\ \dot{\lambda}_y \\ \dot{\lambda}_z \end{bmatrix} = T_{\alpha f} \dot{\lambda} \quad (5)$$

载体角运动与三框架角偏转的速度耦合可表示为 $\omega_o = \omega_{\alpha} + T_{\alpha f} \dot{\lambda}$

通过视轴稳定伺服系统的框架电机偏转抵消载体扰动,此时视轴角速率 $\omega_o = 0$ ,即保证激光通信终端端的视轴稳定指向,框架电机偏转的速度可表示为

$$\dot{\lambda} = -T_{\alpha f}^{-1} \omega_{\alpha} \quad (7)$$

## 2 模糊自抗扰控制器设计

视轴稳定伺服控制包括外框(横滚角)、中框(方位角)和内框(俯仰角)的控制,自抗扰控制器在输入、反馈和前向通道中分别引入几个不同于经典控制的环节.自抗扰控制器包括跟踪微分器(Tracking Differentiator, TD)、扩张状态观测器(Extended State Observer, ESO)和非线性误差反馈律(Nonlinear PID,

NLPD),将模糊理论和自抗扰控制器结合起来,运用模糊推理,实现自抗扰相关参量的自动调整,改进的自抗扰控制器结构如图2。

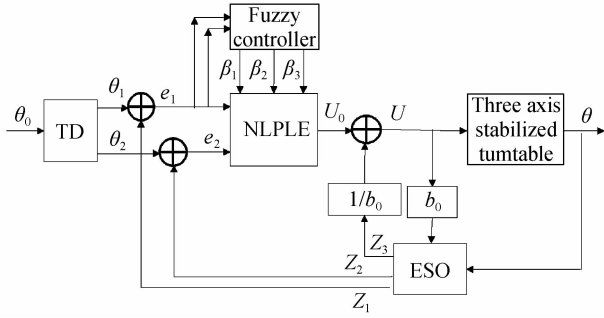


图2 自抗扰控制原理框图

Fig. 2 ADRC principle diagram

## 2.1 跟踪微分器设计

跟踪微分器由一组微分方程组构成,在不放大噪声的情况下,它不但可以对输入信号进行滤波跟踪和微分,还可以兼顾跟踪快速性和过渡过程平稳性,其算法的离散形式表示为<sup>[15]</sup>

$$\begin{cases} \theta_1(k+1) = \theta_1(k) + h\theta_2(k) \\ \theta_2(k+1) = \theta_2(k) - h \cdot f_{st}(\theta_1 - \theta_0, \theta_2, r, h_0) \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中, $k$ 为当前时刻, $\theta_0$ 为参考信号, $\theta_1$ 为参考信号的估计, $\theta_2$ 为参考信号微分的估计, $h$ 为迭代步长, $r$ 为速度因子, $h_0$ 为滤波因子,其中 $f_{st}(\cdot)$ 为非线性函数,定义为

$$\begin{cases} f_{st}(x_1, x_2, r, h_0) = - \begin{cases} ra/d & |a| \leq d \\ r \operatorname{sgn}(a) & |a| > d \end{cases} \\ a = \begin{cases} x_2 + (\operatorname{sgny} \sqrt{d^2 + 8r|y|} - d)/2 & |y| > d_0 \\ x_2 + y/h_0 & |y| \leq d_0 \end{cases} \\ y = x_1 + h_0 x_2 \\ d = rh_0 \\ d_0 = dh_0 \end{cases} \quad (9)$$

## 2.2 扩张状态观测器设计

扩张状态观测器是将所有影响系统稳定输出的因素作为一个整体,统称为“总和扰动”,并将其扩张成为一个新的状态变量,对系统中的各个状态变量以及“总和扰动”进行观测,其数学表达式为

$$\begin{cases} e(k) = Z_1(k) - \theta(k) \\ Z_1(k+1) = Z_1(k) + h[Z_2(k) - \eta_1 f_{al}(e(k), \alpha_1, \delta)] \\ Z_2(k+1) = Z_2(k) + h[Z_3(k) - \eta_2 f_{al}(e(k), \alpha_2, \delta) + \\ b_0 u(k)] \\ Z_3(k+1) = Z_3(k) - \eta_3 f_{al}(e(k), \alpha_3, \delta) \end{cases} \quad (10)$$

式中, $\theta$ 为控制系统输出, $Z_1, Z_2$ 为输出估计和输出微分估计, $Z_3$ 为系统扰动估计, $\eta_i (i=1, 2, 3)$ 为权重因子, $\alpha_i (i=1, 2, 3)$ 为非线性饱和因子.可以应用带宽概念的参量化设计方法来确定扩张状态观测器的参量,那么 $\eta_1 = \omega, \eta_2 = \omega^2, \eta_3 = \omega^3$ , $\omega$ 的适用范围很宽,较容易

调整出 $\omega$ .扩张状态观测器的参量包括 $\alpha_i (i=1, 2, 3)$ ,根据分离性原则进行各部分设计,通过免疫遗传算法对上述参量进行寻优<sup>[16]</sup>.

非线性函数中 $f_{al}(\cdot)$ 定义为

$$f_{al}(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} e\delta^{\alpha-1} & |e| \leq \delta \\ |e| \operatorname{sgn}(e) & |e| > \delta \end{cases} \quad (11)$$

式中, $\delta$ 为切换阈值, $f_{al}(\cdot)$ 是非线性区饱和函数,它有超调小和速度快的优点。

## 2.3 非线性误差反馈律设计

非线性误差反馈律定义为

$$\begin{cases} e_1(k) = \theta_1(k) - Z_1(k) \\ e_2(k) = \theta_2(k) - Z_2(k) \\ U_0(k) = \beta_1 f_{al}(e_1(k), \alpha_1, h_1) + \beta_2 f_{al}(e_2(k), \alpha_2, h_1) + \\ \beta_3 f_{al}(e_2(k), \alpha_2, h_1) \end{cases} \quad (12)$$

式中 $h_1$ 为准确度因子,最后形成的扰动补偿控制量表示为

$$U(k) = \frac{U_0(k) - Z_3}{b_0} \quad (13)$$

式(13)与传统的PID控制非常相似,其区别仅在于采用非线性函数 $f_{al}(\cdot)$ ,这就意味着可以借鉴传统PID控制的模糊参量整定方法<sup>[17]</sup>,参量 $\beta_i (i=1, 2, 3)$ 分别对应于PID控制中的积分、微分和比例系数,系统输入输出模糊集分别定义为{NB, NS, ZO, PS, PB},其中,NB为负大,NS为负小,ZO为零,PS为负小,PB为正大.模糊设计规则如表1所示.以相当于微分系数 $\beta_2$ 为例进行说明,采用加权平均法将模糊输出精确化。

表1  $\beta_2$ 模糊设计规则  
Table 1  $\beta_2$  fuzzy design rules

$e_2$	$e_1$				
	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	PB	PS	PS	PS	ZO
NS	PS	PS	PS	ZO	NS
ZO	PS	PS	ZO	NS	NS
PS	PS	ZO	NS	NS	NM
PB	ZO	NS	NS	NS	NB

## 3 实验分析

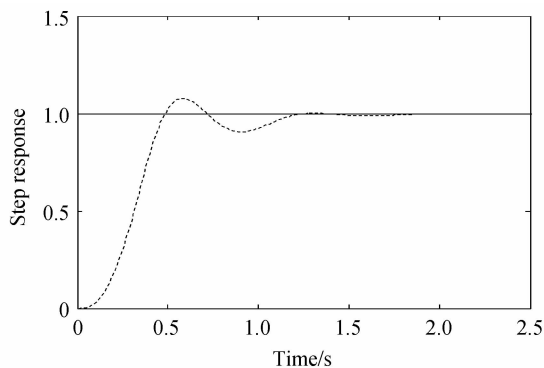
为保证基于空间移动平台的激光通信视轴稳定,视轴稳定系统的控制策略需要具备以下几方面的性能指标:1)响应迅速,超调小;2)稳态误差小;3)具有较好的扰动隔离能力;4)对模型不确定性具有鲁棒性.下面分别开展软件仿真和实物环境模拟实验,进行不同层次对比试验,验证模糊自抗扰算法的有效性。

### 3.1 软件仿真

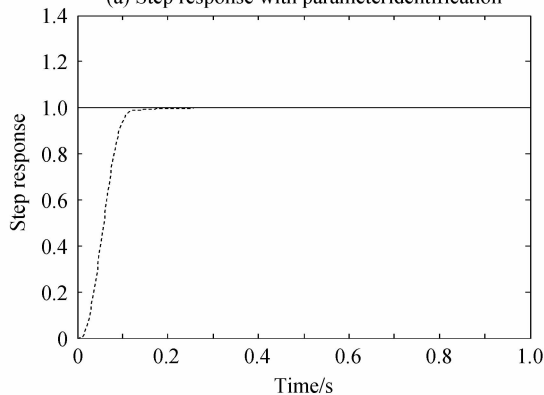
在相同的MATLAB仿真环境下,分别建立基于参量辨识和模糊自抗扰控制器模型,相关电机参量为:电枢电阻15 $\Omega$ ,电气时间常量为0.5 ms,力矩系数为

0.2 N·m·A<sup>-1</sup>,反电动势为0.25 V·s·rad<sup>-1</sup>,转动惯量为1.7 kg·m<sup>2</sup>.利用 Matlab 的 Simulink 单元编程完成对三框架的控制器设计,采用四阶龙格-库塔法解算微分方程.

图3分别为两种控制方法的单位阶跃响应,从图3易知:1)参量辨识PID控制需要耗费1.8 s时间进入稳态,且系统模型输出有一定超调;2)模糊自抗扰控制器模型仅需要0.1s左右时间进行稳定,系统全程输出无超调.显然,模糊自抗扰控制响应快,超调小,这与自抗扰控制器的微分跟踪器结构有很大关系,它可以兼顾跟踪快速性和过渡过程平稳性,同时它的结构也对干扰信号具有明显的滤波作用.



(a) Step response with parameter identification



(b) Step response with ADRC

图3 阶跃响应比较

Fig.3 Step response comparison

在上述仿真模型的基础上,进一步假设载体三轴扰动频率为0.5 Hz,幅度为1°,而伺服扰动项假设为 $W(t) = \alpha\eta(k)$ ,其中 $\alpha$ 为均方差0.3的随机数,取不确定项 $\eta$ 服从正态分布,均值为2,均方差为0.1.

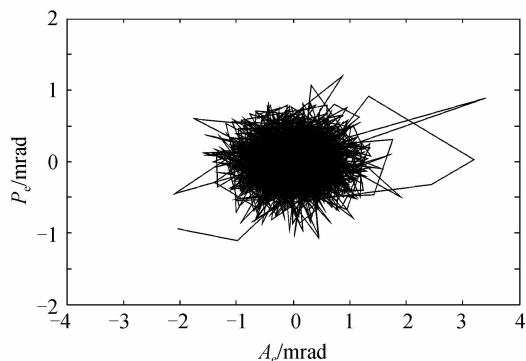
两种控制方法的视轴稳定效果如图4.通过数据分析:1)参量辨识控制的稳定控制误差明显大于自抗扰控制;2)设精跟踪视场为2 mrad,通过控制误差数据分析,不考虑初始阶段的控制震荡,参量辨识控制误差引起的链路中断大约为1.7 s,而自抗扰控制的链路始终保持稳定.从以上数据分析可知自抗扰控制具有稳态误差小,对模型不确定性具有较好鲁棒性.以方位角为对象,从最大控制误差、均方控制误差和扰动隔离度

三个指标进行分析,两种控制方法的数据比较如表2.

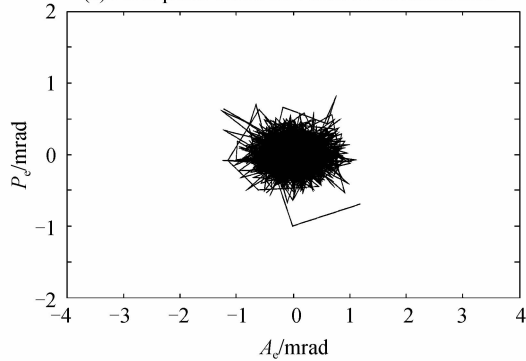
表2 两种控制算法的性能比较

Table 2 Performance comparison of control algorithms

Algorithm	Max error/mrad	Mean square error/mrad	disturbance isolation/dB
Parameter identification	3.23	2.63	-28.4
ADRC	1.57	1.42	-20.7



(a) Error plane based on Parameter identification



(b) Error plane based on ADRC

图4 两种算法的抗干扰性能比较

Fig.4 Anti-interference with two algorithms

### 3.2 实验环境模拟

将视轴稳定伺服平台安装于模拟载体运动的摇摆台上进行实验,摇摆台三轴运动输入为扫频正弦波,输入信号为

$$\begin{cases} v = \sin 2\pi ft \\ f = f_a + f_b t \end{cases} \quad (14)$$

式中, $f_a$ 为初始频率, $f_b$ 为扫频步长,幅度为1°.取 $f_a = 1$  Hz, $f_b = 0.5$  Hz,扫描周期为10 s,即扫描频率为1~4 Hz.

采用上述两种控制方法,对采集的数据进行分析,传感器 CCD 上的方位、俯仰方向跟踪稳定效果如图5、6所示.对比图5和6,可以发现:1)在初始阶段,自抗扰控制的控制稳定收敛时间短,且稳定收敛过程中的震荡幅度较小,如模糊自抗扰控制方法的最大振幅接近2 mrad,而参量识别控制最大误差达到4.7 mrad;2)随着扰动频率的增加,模糊自抗扰控制具有较好的扰动频率适应性,控制误差基本稳定,而参量识别控制的频率适应性较差,随着频率的增加,控制误差显著增

加,后期控制误差接近 5 mrad,相对于初始稳定阶段,误差增加超 100%。从上述分析可知,在隔离载体的角运动耦合方向,自抗扰控制具备较好快速响应性、稳定误差小和抗扰动频率自适应性。在扫频控制模式下,以方位角为对象,两种控制方法的控制效果如表 3。

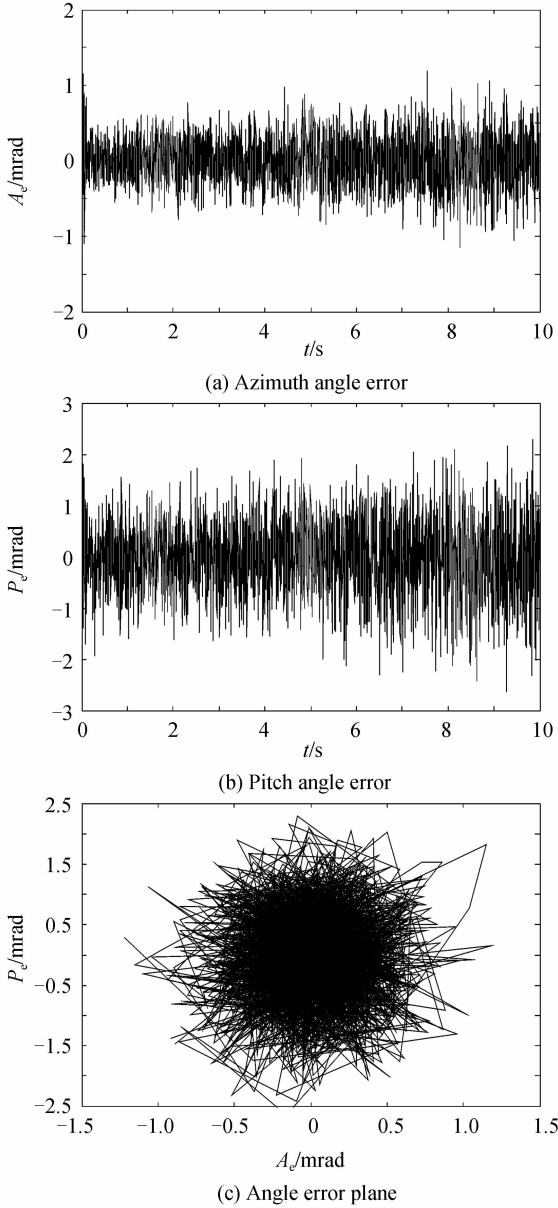


图 5 ADRC 控制误差  
Fig. 5 Control error of ADRC

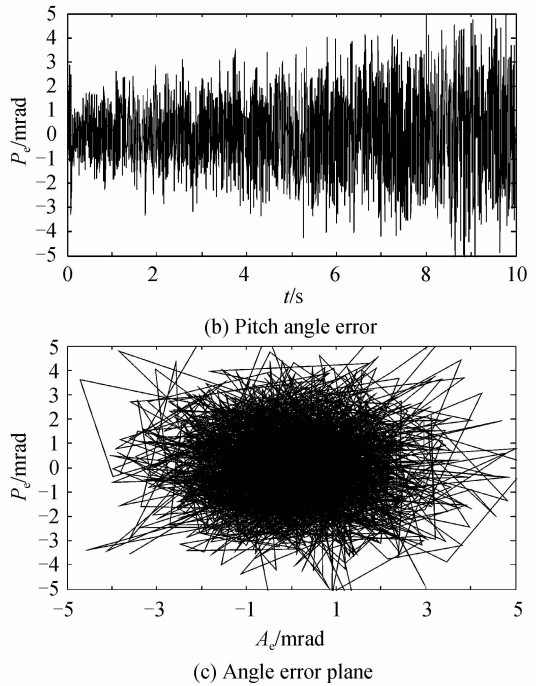
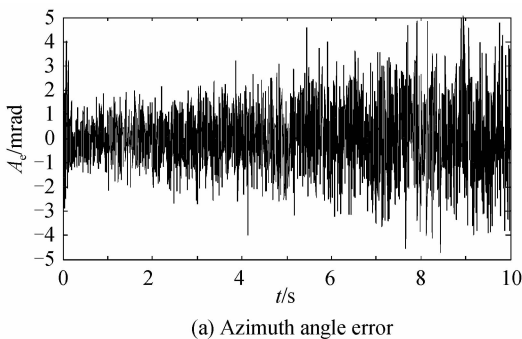


图 6 基参量辨识控制误差  
Fig. 6 Control error of parameter identification

表 3 模拟条件下两种控制算法的性能比较

Table 3 Performance comparison of control algorithms

Algorithm	$f/\text{Hz}$	Max error/mrad	Mean square error/mrad	disturbance isolation/dB
Parameter identification	1~2	3.7	2.63	-29.3
	2~4	4.87	3.21	-36.4
ADRC	1~2	1.65	1.51	-21.2
	2~4	1.93	1.63	-23.4

## 4 结论

为了在传统控制器的基础上进一步提高空间移动平台激光通信终端的视轴稳定能力,结合模糊理论和自抗扰控制方法,可解决自抗扰控制器的参量优化问题。仿真和模拟实验表明,在载体角运动、外部扰动情况下,基于模糊自抗扰的视轴稳定系统具有更小的稳态误差,较好的频率自适应性和扰动隔离性。

### 参考文献

- [1] RRUEGO I, GUERRERO H, S RODRIGUEZ, *et al.* OWLS: a ten-year history in optical wireless links for intra-satellite communications[J]. *Selected Areas in Communications*, 2009, **27**(9): 1599-1611.
- [2] TOYOSHIMA M, TAKENAKA H, SHOJI Y, *et al.* Results of Kirari optical communication demonstration experiments with NICT optical ground station (KODEN) aiming for future classical and quantum communications [J]. *Acta Astronautica*, 2012, **74**(3): 40-49.
- [3] BHATNAGA M, ARTI M. Performance analysis of hybrid satellite-terrestrial FSO cooperative system [J]. *Photonics Technology Letters*, 2013, **25**(22): 2197-2200.
- [4] NARESH K, RANA D. Enhanced performance analysis of inter-aircraft optical-wireless communication (IAOWC) system [J]. *Optic*, 2014, **125**(1): 486-488.

- [5] LUNA R, BORAH D K, JONNALAGADDA R, *et al.* Experimental demonstration of a hybrid link for mitigating atmospheric turbulence effects in free-space optical communication [J]. *Photonics Technology Letters*, 2009, **21**(17): 1196-1198.
- [6] GRACE D, CAPSTICK M H, MOHORCIC M, *et al.* Integrating users into the wider broadband network via high altitude platforms [J]. *Wireless Communications*, 2005, **12**(5): 98-105.
- [7] KARAPANTAZIS S, PAVLIDOU F. Broadband communication via high-altitude platforms: a survey [J]. *Communications Surveys & Tutorials*, 2005, **7**(1): 2-31
- [8] CAO Yang, RONG Jian, ZHANG Hong-min, *et al.* Fuzzy variable structure multiple-model tracking for airborne laser communication system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(8): 94-99.  
曹阳, 荣健, 张红民, 等. 机载激光通信终端的模糊变结构跟踪方法研究 [J]. 光子学报, 2014, **43**(8): 94-99.
- [9] LIU Peng, WANG Xiao-man, HAN Cheng, *et al.* Simulation of acquisition subsystem in space-ground optical communication system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(2): 98-103.  
刘鹏, 王晓曼, 韩成, 等. 空地激光通信系统中捕获子系统仿真 [J]. 光子学报, 2014, **43**(2): 98-103.
- [10] LIU Yun-qing, JIANG Hui-lin, TONG Shou-feng, *et al.* Stabilization tracking technology for atmospheric laser communication system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(7): 972-977.  
刘云清, 姜会林, 佟首峰. 大气激光通信中稳定跟踪技术研究 [J]. 光子学报, 2011, **40**(7): 972-977.
- [11] SONG Yan-song, TONG Shou-feng, JIANG Hui-lin, *et al.* Variable structure control technology of the fine tracking assembly in airborne laser communication system [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2010, **39**(5): 934-938.  
宋延嵩, 佟首峰, 姜会林, 等. 机载激光通信系统精跟踪单元变结构控制技术 [J]. 红外与激光工程, 2010, **39**(5): 934-938.
- [12] ZUO Tao, AI Yong, HUANG Hai-bo, *et al.* Multiple control method of ATP system for space optical communication [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2011, **40**(1): 107-111.  
左韬, 艾勇, 黄海波. 空间光通信 ATP 系统的复合控制方法 [J]. 红外与激光工程, 2011, **40**(1): 107-111.
- [13] QIU Bao-mei, WAN Ji-quan, WANG Jian-wen. Active disturbance rejection controller of the aerial photography stabilized platform [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, **39**(4): 21-26.  
邱宝梅, 万吉权, 王建文. 机载摄影稳定平台的自抗扰控制 [J]. 光电工程, 2012, **39**(4): 21-26.
- [14] LI Q, XUE K, LI X. Design and dynamic coupling analysis of three aixmotion simulator [J]. *Journal of Machine Design*, 2012, **29**(5): 15-20.  
李强, 薛开, 李霞. 三轴仿真转台设计及动力学耦合分析 [J]. 机械设计, 2012, **29**(5): 15-20.
- [15] LEONARD F, MARTINI A, ABBA G. Robust nonlinear controls of model-scale helicopters under lateral and vertical wind gusts [J]. *Control Systems Technology*, 2012, **20**(1): 154-163.
- [16] LAI Ai-fang, GUO Yu, ZHENG Li-jun. Active disturbance rejection control for spacecraft attitude maneuver and stability [J]. *Control Theory & Applications*, 2012, **29**(3): 401-406.  
赖爱芳, 郭毓, 郑立君. 航天器姿态机动及稳定的自抗扰控制 [J]. 控制理论与应用, 2012, **29**(3): 401-406.
- [17] WU Lei, BAO Hong, DU Jing-Li, *et al.* Learning algorithm for parameters of automatic disturbances rejection controller [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(3): 556-560.  
武雷, 保宏, 杜敬利, 等. 一种自抗扰控制器参数的学习算法 [J]. 自动化学报, 2014, **40**(3): 556-560.